

## طراحی محفظه تخمیر و ساخت هاضم بی‌هوازی ناپیوسته به‌منظور تولید بیومتان

آرمان جلالی<sup>۱\*</sup>، رضا عبدی<sup>۲</sup>، شمس‌اله عبدالله‌پور<sup>۲</sup> و سید فرامرز رنجبر<sup>۳</sup>

### چکیده

راکتور قلب واحد بیوگاز است. طراحی اصولی هاضم بی‌هوازی باعث افزایش بهره‌وری تولید گاز متان می‌گردد. در این تحقیق با هدف طراحی هاضم بی‌هوازی سه روش طراحی حجمی هاضم بر اساس میزان بیوگاز مصرفی، میزان سوبسترای موجود و فرمول شیمیایی سوبسترا بررسی شده که با توجه به شرایط می‌توان در طراحی انتخاب نمود. این طراحی بر مبنای نیاز به حجم معینی بیوگاز مورد نیاز برای پخت‌وپز روستایی در نظر گرفته شده است. با استفاده از روابط مرتبط بین حجم هاضم و مقدار تولید بیوگاز و با انتخاب سوبسترای که کمترین میزان تولید بیوگاز را به ازای حجم دارد، اقدام به طراحی واحد گردید. ابتدا مقدار سوبسترای مورد نیاز برای تولید مقدار مشخص گاز تعیین گردید و در نتیجه محاسبه حجم تخمیر، ابعاد راکتور و تعیین جنس راکتور اقدام شد. مقدار حجم مورد نیاز گاز محاسبه شده برای ذخیره‌سازی یک روزه در خود هاضم، برابر ۷۷ لیتر است. حجم نهایی هاضم برابر مجموع حجم ذخیره گاز و حجم تخمیر است که برابر با ۴۰۰ لیتر محاسبه گردید. بعد از ساخت هاضم طراحی شده، با استفاده از سوبسترای گاوی، هاضم به مدت ۴۰ روز تست گردید. مشاهده شد بعد از ۱۰ روز، بیوگاز تولید شده قابل اشتعال شد. بیش‌ترین مقدار متان تولیدی ۷۹ درصد و مقدار بیوگاز تولیدی ۲۰۵ لیتر اندازه‌گیری و ثبت گردید. مقدار کل بیوگاز تولیدی در ۴۰ روز ۷۰۴۰ لیتر بود. مهم‌ترین نتیجه حاصل از این پژوهش، دستیابی به دانش فنی طراحی و ساخت و بهینه‌سازی یک هاضم بیوگاز است. به‌ویژه آن‌که سعی بر آن شده است که نیازمندی‌های داخلی یا برآورده نماید و قابلیت بهره‌گیری در سطوح مختلف کاربری و تحقیقات آتی را داشته باشد.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی، بیوگاز، بی‌هوازی، راکتور، هاضم.

ارجاع: جلالی آ. عبدی ر. عبدالله‌پور ش. و رنجبر س. ف. ۱۴۰۰. طراحی محفظه تخمیر و ساخت هاضم بی‌هوازی ناپیوسته به‌منظور تولید بیومتان. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۰: ۴۳-۵۴.

۱- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز.

۲- دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه تبریز.

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز.

\* نویسنده مسئول: [a.jalali@tabrizu.ac.ir](mailto:a.jalali@tabrizu.ac.ir)

## مقدمه

به‌طور کلی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو، شامل انرژی‌های خورشیدی، هسته‌ای، بادی، زمین گرمایی و بیوگاز است. بیوگاز با استفاده از زیست‌توده گیاهان، پسماندهای حیوانی و مواد زائد و پسماندهای حاصل از فعالیت‌های بشر در زمینه‌های مختلف، قابل تولید است. ایران با دارا بودن منابع زیاد با قابلیت استفاده در تولید بیوگاز، می‌تواند بخش بزرگی از نیاز انرژی خود را از این طریق برطرف نماید (Jalali et al., 2018).

مجموعه گازهای تولیدشده از تجزیه و تخمیر فضولات حیوانی یا انسانی و گیاهی در حضور فعالیت باکتری‌های غیرهوازی به‌ویژه متان‌زها و در فقدان اکسیژن در یک محفظه تخمیر را اصطلاحاً بیوگاز می‌نامند (Abbaspourfard et al., 2011). اصول تخمیر بی‌هوازی در دستگاه‌های هاضم بیوگاز، تقریباً مشابه شکمبه نشخوارکنندگان انجام می‌گیرد، اما به دلیل اهمیت باکتری‌های متان‌ساز، ایجاد شرایط محیطی و غذایی برای فعالیت این باکتری‌ها در اولویت است. فرایند تخمیر در تولید بیوگاز به چهار مرحله و یا فاز تقسیم می‌شود، اما دو مرحله ساخت اسید و متان از اهمیت ویژه‌ای برای کنترل تخمیر و تولید بیوگاز برخوردارند (Sharifi & Khadem, 2012).

مزیت بیوگاز در مقایسه با سایر سوخت‌های مورد استفاده در حمل‌ونقل از قبیل بیواتانول و بیودیزل، این است که امکان تهیه این سوخت از گستره وسیعی از انواع مختلف سوبسترا یا خوراک اولیه وجود دارد. تولید بیوگاز به دلیل توانایی مجموعه میکروبی موجود در فرایند برای تبدیل گستره وسیعی از خوراک اولیه ارزان قیمت، می‌تواند یک فناوری کم هزینه در نظر گرفته شود (Bruni et al., 2010). خوراک اولیه، غذای میکروارگانیسم‌ها در فرایند تولید بیوگاز است؛ خصوصیات خوراک اولیه نه تنها بر بازدهی و ثبات فرایند، بلکه بر کیفیت ماده هضم شده در مورد مواد ریز مغذی و آلودگی‌ها نیز تاثیر می‌گذارد (Schnurer & Jarvis, 2010; Weiland, 2010).

قلب و مرکز یک واحد بیوگاز رآکتور آن است. این سیستم، یک تانک آب‌بندی و هوابندی شده است که در داخل آن در غیاب اکسیژن، تجزیه بیولوژیکی خوراک اتفاق می‌افتد و بیوگاز تولید می‌گردد. ویژگی مشترک تمامی هاضم‌ها، غیر از هوا بند بودن آن‌ها، این است که

دارای سیستم ورود خوراک و خروج بیوگاز و پسماند هستند. بر اساس شرایط اقلیمی منطقه، هاضم‌های بی‌هوازی می‌توانند عایق کاری شده یا حرارت‌دهی شوند (Babae & Shayegan, 2011).

جنبه‌های مختلف طراحی هاضم بی‌هوازی از قبیل نرخ بارگذاری آلی بیشتر، زمان ماند هیدرولیکی کمتر و افزایش تفرايندیوگاز که در فرایند طراحی یک هاضم زیستی در نظر گرفته می‌شود، بسیار مهم هستند (Ward et al., 2008). پارامترهای فیزیکی و عملیاتی علاوه بر خصوصیات ماده ورودی به هاضم، در میزان بیوگاز حاصل شده حائز اهمیت است (Vandevivere et al., 2003).

همچنین خوراک اولیه سرشار از مواد لیگنوسلولزی مانند علوفه سیلویی، میزان مواد جامد، میزان حلالیت و نرخ هیدرولیز بسیار تعیین کننده هستند (Qi et al., 2005). مطالعه شیمی و میکروبیولوژی هضم بی‌هوازی نشان می‌دهد پارامترهای زیادی از جمله دما، pH و قلیایی بودن، زمان ماند، اندازه ذرات، نوع هاضم و فرایند و همزنی بر بازده هضم بی‌هوازی مؤثر است. لجن یا مواد آلی کاملاً تجزیه نشده همراه با مواد مغذی غیر آلی را می‌توان پس از فرایند تجزیه، به‌عنوان کود استفاده کرد. بدیهی است که کیفیت این کود به ماهیت و ترکیب زیست‌توده تجزیه یافته و همچنین شرایط کاری هاضم بی‌هوازی بستگی دارد (Abbaspourfard et al., 2011).

هضم تر سوبسترا در هاضم بی‌هوازی به‌صورت مقدار مواد جامد ترکیب با آب در سیستم است. در این حالت پسماند دارای مواد جامد ۱۰ تا ۲۰ درصد است (Abbaspourfard et al., 2011). در پژوهش‌هایی (David & Leckie, 1981) بیان کردند که مقدار ماده جامد سوبسترا بین ۷ تا ۹٪ برای اغلب هاضم‌های بی‌هوازی‌تر مناسب‌اند، حتی اگر رآکتور دارای همزن نباشد. تخمیر خشک می‌تواند با مواد جامد به مقدار ۳۰ تا ۴۰ درصد نیز کار کند (Luning et al., 2003). زمان ماند عبارت است از زمان مورد نیاز برای تخمیر مواد در داخل هاضم و بیش‌ترین مقدار زمان ماند بستگی به دمای هاضم دارد. معمولاً ۴۰-۱۰۰ روز برای رآکتورهای دمایی سایکروفیلیک ۲۰-۴۰ روز برای رآکتورهای دمایی مزوفیلیک و ۱۵-۲۵ روز برای ترموفیلیک گزارش شده است (Drapcho et al., 2008). برای هاضم‌ها با تغذیه پیوسته، افزایش زمان ماند منجر به سیستم بزرگ‌تر می‌شود تا مواد در داخل آن برای

اندازه این هاضم‌ها، مقیاس واحدهای بیوگاز را تعیین می‌کند و از چند مترمکعب در مقیاس خانگی تا چند هزار مترمکعب در مقیاس صنعتی و تجاری که معمولاً دارای چندین رآکتور هستند را در برمی‌گیرد (Mousavi Ghidari & Gholami, 2014).

در یک پژوهش، Gallert *et al.* (2003)، در رابطه با اثر و دقت داده‌های جمع‌آوری شده در هاضم مدل آزمایشگاهی و تخمین عملکرد هاضم سبزی صنعتی، در پارامترهای پایه یکسان نشان دادند که در مخازن آزمایشگاهی، با افزایش نرخ بارگذاری، عملکرد رآکتور تحت تأثیر قرار می‌گیرد، در حالی که در مقدار بیشینه پایدار نرخ بارگذاری می‌تواند نگهداری شود. بدین‌گونه که اجازه به افزایش استفاده از ضایعات آلی و افزایش بازده تیمار ضایعات داده شود. در پژوهشی دیگر، Brunn *et al.* (2009)، دو مدل آزمایشگاهی به حجم ۱۲۰ لیتر و واحد صنعتی به حجم ۴/۶ میلیون لیتر در شرایط یکسان، به‌صورت موازی راه‌اندازی کردند و تجزیه مواد جامد فرار، کربن آلی، آمونیاک، اسید آلی و بیوگاز تولیدی را مقایسه کردند. تفاوت‌ها در میزان گاز تولیدی ویژه بود. گزارش‌ها حاکی از آن بود که میزان کل گاز در نوع صنعتی ۳۶ درصد بیش‌تر از میزان تخمین زده شده بوده است.

رآکتور هضم بی‌هوای قلب فرایندهای تولید بیوگاز است. این دستگاه‌ها تا به حال دستخوش تغییرات زیادی بوده‌اند و مدل‌های مختلفی با قابلیت‌های متفاوت توسعه پیدا کرده‌اند. برای تولید بیوگاز به شکل موفقیت‌آمیز و با بازدهی بالا، انتخاب درست دستگاه تولید بیوگاز امری ضروری است. برای داشتن یک انتخاب درست، باید مجموعه‌ای از فاکتورها همچون، فاکتورهای اقتصادی، به‌کارگیری مواد محلی، دوام دستگاه، سازگاری با مواد ورودی مورد استفاده و تناوب انجام عملیات باید مورد توجه قرار گیرند.

هاضم بی‌هوای می‌تواند در اندازه‌های مختلف از کوچک برای تولید گاز مصرفی خانگی، متوسط برای مصارف مدیریت پسماند و گاوداری‌ها و بزرگ برای مصارف نیروگاهی ساخته شود. هاضم می‌تواند در شکل‌ها و سایزهای مختلف با استفاده از مواد مختلف ساخته شود. در کل از سه روش می‌توان حجم رآکتور را محاسبه نمود که عبارت‌اند از:

مدت طولانی حضور داشته باشند و این موضوع از لحاظ اقتصادی می‌تواند با افزایش دمای هاضم جبران شود (Drapcho *et al.*, 2008).

محلول آبکی هاضم بهتر است بین ۵ تا ۱۲ درصد مواد جامد کل (TS) داشته باشد و بهترین TS برای ماده آبکی برای تخمیر ۸٪ است. حساب فرضی برای آبکی کردن یا رقیق کردن ضایعات گاوی شامل ۲/۵ قسمت آب برای یک قسمت فضولات خشک، یا یک قسمت آب به ازای هر قسمت فضولات تازه است (Rittmann & McCarty, 2012).

انواع مختلف هاضم‌های بی‌هوای برای اهداف آزمایشگاهی، صنعتی، نیمه‌صنعتی و پایلوت وجود دارند. نوع طرح و مصالح به‌کاررفته، هزینه ساخت و سیستم عملکردی، بر انتخاب این مدل‌ها دخیل است (Polprasert & Koottatep, 2007). هاضم‌های بی‌هوای که به‌منظور هضم مواد آلی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در طیف وسیعی از شرایط مختلف در ارتباط با مواد هضم‌شونده و هاضم تقسیم می‌شوند. هاضم‌ها می‌توانند از یک استوانه ساده کوچک تا یک هاضم کاملاً خودکار خودکار طراحی و ساخته شوند. انواع هاضم‌ها، عمدتاً به‌صورت استوانه‌های افقی یا عمودی و مکانیزم‌های مورد استفاده در آن‌ها، عمدتاً محموله‌ای، نیمه‌پیوسته و یا کاملاً پیوسته است. از طرف دیگر، تغذیه مواد، بسته به طراحی هاضم، می‌تواند به‌صورت خشک و تر صورت پذیرد. همه فاکتورهای یاد شده در طراحی و ساخت هاضم‌ها به‌گونه‌ای باهم تلفیق می‌شوند تا بالاترین بازده تولید انرژی از انواع پسماند حاصل شود (Lissens *et al.*, 2001; Luning *et al.*, 2003; Bolzonella *et al.*, 2006; Rasapour *et al.*, 2016).

هاضم‌های بی‌هوای در حالت کلی به شش دسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: (۱) نحوه فعالیت میکروارگانیسم‌ها (چسبنده و معلق)، (۲) میزان رطوبت مواد سوپسترا (تر و خشک)، (۳) نوع تغذیه (محموله‌ای، پیوسته و نیمه‌پیوسته)، (۴) شکل هاضم، (۵) نوع عملیات هضم و (۶) نوع مواد ورودی.

انواع مختلفی از رآکتورهای بیوگاز وجود دارند که در تمام گوشه‌وکنار دنیا در حال فعالیت‌اند، هاضم‌های بی‌هوای می‌توانند از بتن، فولاد، آجر یا پلاستیک و به اشکال شبیه سیلو، به‌صورت ناودانی، لگنی و حوضچه‌ای ساخته شوند و ممکن است در زیر یا روی سطح زمین جاسازی شوند.

انجام گرفت. نمونه تازه فضولات گاوی ماده و گوساله از دامداری مجاور شهر تبریز در زمان صبح تهیه و برای انجام آزمایش‌ها به محل آزمایشگاه‌ها انتقال داده شد. فضولات محل نگهداری روزانه تمیز می‌شدند.

با بررسی‌های به‌عمل‌آمده در زمینه تولید بیوگاز، برای طراحی مطلوب و تولید مقدار معینی بیوگاز، پسماندی که کم‌ترین مقدار تولید بیوگاز را دارد، بر اساس بررسی منابع شناسایی شد، چراکه اگر پسماندی در حجم مشخص با قابلیت تولید بیوگاز کم‌تر، بتواند مقدار معین بیوگاز را تولید نماید، منابع دیگر در همان حجم سوپسترا مقدار بیش‌تری بیوگاز را تولید خواهند نمود. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که کم‌ترین مقدار تولید بیوگاز مربوط به فضولات گاوی است؛ یعنی مقدار حجم زیادی از فضولات گاوی در شرایط یکسان سایر سوپستراها، مقدار بیوگاز کم‌تری را تولید می‌کند. دلیل دومی که از این پسماند برای طراحی انتخاب گردید، امکان استفاده از طراحی هاضم برای خانه‌های روستایی و گاوداری‌ها هست که بتوان در صورت جواب‌دهی، سامانه بیوگاز را در خانه‌های روستایی به طور شخصی یا عمومی برای چند خانه، در مرحله اول برای انجام امور پخت‌وپز استفاده نمود.

۱- میزان بیوگاز مورد نیاز و مصرفی ( Polprasert & Kootatep, 2007).

۲- میزان سوپسترای موجود و مدیریت پسماند ( Mousavi Ghidari & Gholami, 2014).

۳- بر اساس فرمول شیمیایی سوپسترا و توان گاز تولیدی سوپسترا (Rowse, 2011).

طراحی هاضم، یک امر کلیدی در توسعه انرژی بیوگاز است و شامل انتخاب تکنولوژی، تعیین ابعاد و چیدمان واحدها است. با توجه به عدم وجود منابع جامع برای طراحی هاضم بی‌هوازی هدف از این تحقیق بررسی و رسیدن به دانش فنی هاضم‌ها بر اساس واحدهای بیوگاز - رآکتورهای بیوگاز - نکات و موارد فنی، پارامترهای انتخابی و قوانین مهندسی طراحی حجمی واحد بیوگاز برای بهبود عملکرد هاضم و افزایش بازده تولید متان بیوگاز و ساخت پایلوت آزمایشگاهی است.

هدف عمده در این پژوهش دستیابی به روش‌های طراحی، محاسبات و ساخت رآکتور هضم بی‌هوازی برای افزایش راندمان تولید بیوگاز و درصد متان است.

### مواد و روش‌ها

این تحقیق در آزمایشگاه بیوانرژی و بازیافت گروه مهندسی بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز

جدول ۱- عملکرد بیوگاز از پسماندهای مختلف (Polprasert & Kootatep, 2007)؛

مواد خام	مقدار تولید بیوگاز به‌ازای واحد وزن مواد جامد (مترمکعب به ازای کیلوگرم)	دما (درجه سلسیوس)	درصد متان	زمان تخمیر (روز)
Cow dung	۰/۳۳	-	-	-
Cattle manure	۰/۳۱	-	-	-
Cattle manure (India)	۰/۲۳ - ۰/۵۰	۱۱/۱ - ۳۱/۱	-	-
Cattle manure (Germany)	۰/۲۰ - ۰/۲۹	۱۵/۵ - ۱۷/۳	-	-
Beef manure	۰/۱۸۶ <sup>a</sup>	۳۵	۵۸	۱۰
Beef manure	۱/۱۱	۳۵	۵۷	۱۰
Chicken manure	۰/۳۱ <sup>b</sup>	۳۷/۲	۶۰	۳۰
Poultry manure	۰/۴۶ <sup>c</sup> - ۰/۵۴	۳۲/۵	۵۸	۱۰ - ۱۵
Poultry manure	۰/۵۶ <sup>b</sup>	۵۰/۶	۶۹	۹
Pig manure	۰/۶۹ - ۰/۷۶	۳۲/۵	۵۸ - ۶۰	۱۵ - ۱۰
Pig manure	۰/۴۹	۳۲/۸	۶۱	۱۰
Pig manure	۱/۰۲	۳۵	۶۸	۲۰
Sheep manure	۰/۳۷ - ۰/۶۱	-	۶۴	۲۰
Forage leaves	۰/۵	-	-	۲۹
Suger beet leaves	۰/۵	-	-	۱۴
Algea	۰/۳۲	۴۵ - ۵۰	-	۲۰ - ۱۱
Nightsoil	۰/۳۸	۲۰ - ۲۶/۱	-	۲۱

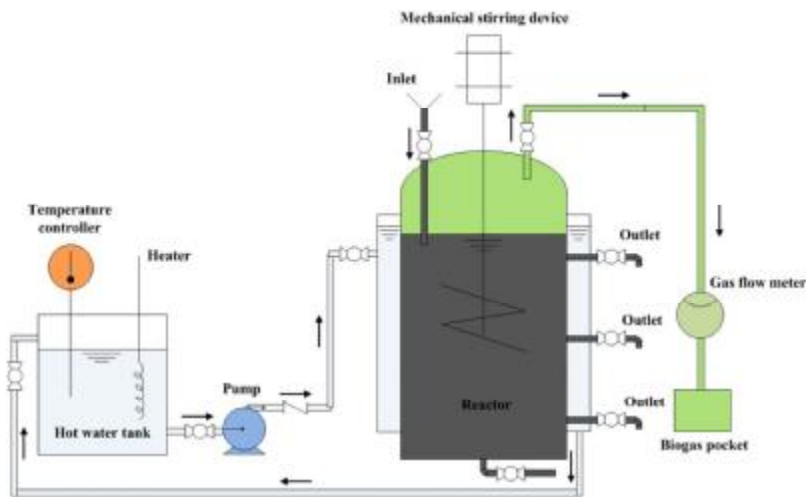
a: بر پایه ذرات جامد کل؛ b: بر پایه ذرات فرار کل؛ c: حیوان در مرحله رشد است.

## طراحی حجم رآکتور

در طراحی حجم رآکتور به شرح زیر اقدام گردید:

- ۱- تعیین مقدار گاز مورد نیاز؛ ۲- محاسبه مقدار سوپسترای مورد نیاز؛ ۳- محاسبه حجم تخمیر؛ ۴- محاسبه ابعاد رآکتور؛ ۵- تعیین جنس رآکتور.
- اجزای اصلی این واحدها نیز شامل مخزن تخمیر، مخزن گاز، حوضچه ورودی و حوضچه خروجی است (شکل ۱) (Ghaemi & Sadeghi, 2014). البته حوضچه‌ها می‌توانند

به صورت کلی ورودی و خروجی در نظر گرفته شوند. ساخت تجهیزات دستگاهی بیوگاز در گذشته بسیار پرهزینه و پیچیده بود، اما امروزه با ساخت این‌گونه دستگاه‌ها، علاوه بر روش‌های نوین، می‌توان اقدام به ساخت هاضم‌های ساده، ارزان و قابل انتقالی نمود که قدرت بررسی لحظه‌به‌لحظه در آن وجود داشته باشد (Sharifi & Khadem, 2012).



شکل ۱- طرح‌واره هاضم و قسمت‌های مختلف رآکتور

می‌توان در شرایط یکسان آن را به هاضم‌های بزرگ‌تر تعمیم داد تا با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در نمونه پایلوت، در هاضم‌های بزرگ و نیمه‌صنعتی و صنعتی تصمیم‌گیری نمود. بر این اساس، ابتدا تمامی روش‌های موجود برای طراحی یک رآکتور مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفتند. با توجه به نیاز به تولید معین گاز روزانه، استفاده از معادلاتی که منتهی به تولید مقدار معین گاز می‌گردند، انتخاب شدند و بعد از بررسی محدودیت‌های موجود در طراحی و اطلاعات موجود روش طراحی مورد نظر، انتخاب شد (Polprasert & Koottatep, 2007).

با توجه به معادلات (۱) تا (۱۱) طراحی سامانه انجام گردید. چون در این مطالعه هدف تولید مقدار معینی بیوگاز است و با توجه به معادله (۱) با افزایش نرخ تولید گاز از سوپسترا، میزان سوپسترای مورد نیاز کاهش می‌یابد و بالعکس، در نتیجه مقدار سوپسترا بر حجم تأثیر می‌گذارد. بر اساس مطالعات انجام‌گرفته و منابع و استاندارد ASAE D384/2 (2005) کم‌ترین میزان تولید

در این تحقیق سامانه‌ای طراحی گردید که بتواند در مقیاس خانگی، مصرف گاز یک خانواده چهار نفری را تولید کند؛ درعین‌حال، بتوان در آزمایشگاه برای کارهایی همچون شبیه‌سازی و تحقیقاتی از آن استفاده نمود.

در روستا، اولویت با پخت‌وپز است. با توجه به بررسی منابع، یک خانواده چهار نفری روزانه برای پخت‌وپز نیاز به ۰/۸۵ مترمکعب گاز دارد که این مقدار برای ایران یک مترمکعب بیان شده است (Sadeghi, 2014, Nijaguna, 2012, Ghaemi & Sadeghi, 2014). طبق گزارش‌ها در ایران، فشار نسبی گاز مصرفی داخل لوله در خانه‌ها ۰/۲۵ psi است ولی در این پژوهش فشار نسبی ۰/۱ اتمسفر (کنترلر گاز خانگی) در نظر گرفته شد؛ یعنی در فشار ۰/۱ اتمسفر گاز در خانه مصرف می‌گردد. با در نظر گرفتن زمان ماند ۶۰ روز با توجه به استاندارد BRC و استفاده از معادله (۱) مقدار حجم روزانه مورد نیاز فضولات ۰/۴۵ مترمکعب تخمین زده شد.

بر اساس بررسی منابع صورت‌گرفته، اگر حجم هاضم طراحی شده بیش‌تر از ۵۰ لیتر باشد (Brunn et al.,

حجم قسمت گازی محفظه که مجموع دو حجم ذخیره‌سازی گاز ( $V_{gs}$ ) و حجم جمع‌آوری گاز ( $V_c$ ) است از معادلات (۳) تا (۵) محاسبه گردید (Anonymous, 2014).

$$V_s = \%15 V_{total} \quad (3)$$

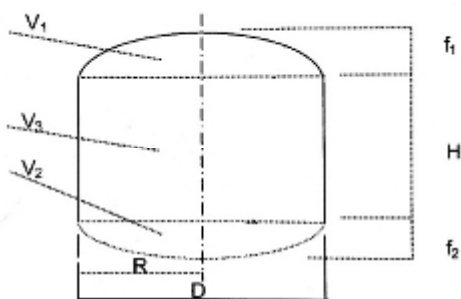
$$V_{gs} + V_f = \%80 V_{total} \quad (4)$$

$$V_{gs} = \cdot / \Delta (V_{gs} + V_f + V_s) k \quad (5)$$

عبارت  $k$ : ضریب تولید گاز به ازای مترمکعب هاضم و برابر  $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{-day}$  است (Anonymous, 2014). برای تعیین ابعاد هاضم از معادلت (۶) تا (۱۱) استفاده شد (شکل ۳):

$$V_f = \frac{\pi D^2}{4} H_f \quad (6)$$

که  $H_f$  ارتفاع هاضم ( $m$ ) و  $D$  قطر هاضم ( $m$ ) است.



شکل ۳- طرح‌واره ابعاد رآکتور

نسبت ارتفاع به قطر، معمولاً برای هاضم بی‌هوازی بین  $0.5$  تا  $3/5$  بیان شده است (Nijaguna, 2012). سایر ابعاد هاضم، شعاع‌های نواحی منحنی از معادلات (۷) و (۸) و حجم نواحی گازی از معادلت (۹) و (۱۰) زیر محاسبه می‌گردد:

ارتفاع قسمت گاز (متر):

$$f_1 = D/\Delta \quad (7)$$

$$f_2 = D/\Delta \quad (8)$$

$$V_{gs} = \cdot / \Delta \times TS \times y_g \quad (9)$$

$$V_1 = V_g + \frac{\pi D^2}{4} H_1 \quad (10)$$

$H_1$ : ارتفاع قسمت لجن (متر)

$y_g$ : ضریب تولید بیوگاز منطقه (بدون واحد)

$H_1$  = ارتفاع خروجی مایع و فاصله مایع از محفظه گاز و TS درصد مواد جامد است.

بیوگاز از سوپسترا، استفاده از کود گاوی است (Rohlich & Walbot, 1977). بدین معنی که برای تولید مقدار معینی بیوگاز، نیاز به حجم زیادی از سوپسترای فضولات گاوی است (جدول ۱). ضریب تبدیل مواد جامد کود گاوی با توجه به جنسیت گاو و سن آن از  $0.3$  تا  $1/1$  مترمکعب به ازای کیلوگرم مواد جامد کود گاوی است (Rohlich & Walbot, 1977; Polprasert & Koottatep, 2007). همچنین، در بررسی‌های به عمل آمده برای ایران این ضریب  $0.4$  مترمکعب به ازای کیلوگرم فضولات گاوی در نظر گرفته شده است (Ghaemi & Sadeghi, 2014).

$$V_{CH_4} (m^3/day) = 0.35 E Q S_0 (10^{-3}) \left( 1 - \frac{1.42 Y}{1 + k_d \theta_c} \right) \quad (1)$$

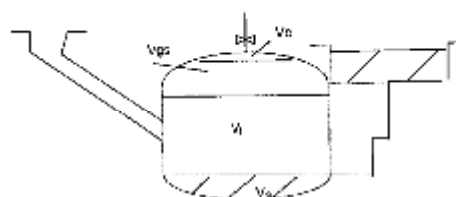
پارامتر  $E$  بازده شکستن پسماند پایدار؛  $Q$  نرخ جریان مواد (مترمکعب در روز)؛  $S_0$  برابر BOD نهایی (گرم بر مترمکعب) که مقدار آن برابر تجزیه‌پذیری نهایی COD در نظر گرفته می‌شود. عبارت  $Y$  ضریب عملکرد باکتری‌های هاضم؛  $k_d$  ضریب تقلیل باکتری‌های بی‌هوازی؛  $\theta_c$  زمان ماند سلول (روز) است (Polprasert & Koottatep, 2007).

با توجه به داده‌های آزمایشگاهی این مقدار برای نسبت‌های مهم ترکیب آبی سوپسترا موجود است. بیش‌ترین مقدار COD برای فضولات گاوی تازه و یا در ترکیب نسبت یک‌به‌یک با آب است که در آزمایشگاه شیمی طبق استاندارد ASTM 1252 D، اندازه‌گیری و این مقدار استفاده شد.

حجم رآکتور مطابق شکل ۲ از مجموع حجم: گاز، ( $V_g = V_{gs} + V_c$ ) حجم تخمیر ( $V_f$ ) و حجم لجن ( $V_s$ ) مطابق معادله (۲) محاسبه می‌شود (Anonymous, 2014).

$$V_T = V_g + V_f + V_s \quad (2)$$

پارامتر  $V_T$  حجم کل رآکتور است.



شکل ۲- تقسیم‌بندی حجم رآکتور

حجم گاز تولیدی در شرایط مصرفی در فشار ۰/۱ اتمسفر برابر یک مترمکعب است. خود هاضم باید دارای حجمی باشد تا حداقل مقدار بیوگاز تولیدی یک روز را بتواند در خود گنجایش داده و بقیه را برای مصرف یا ذخیره در مخزن جداگانه گاز منتقل کند؛ بنابراین، حجم قسمت ذخیره گاز مخزن عبارت خواهد بود از (معادله (۱۲)):

$$V_{gs} = 0.5 \times 0.95 \times V_T \times k \quad (12)$$

که در آن  $V_T$  و  $V_{gs}$  به ترتیب حجم قسمت گاز و حجم کل مخزن و مقدار ( $k$ ) ضریب تولید بیوگاز است این مقدار ۰/۴ مترمکعب به ازای هر مترمکعب هاضم در روز است (Karimi & Mohammadi, 2015). با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی در این زمینه، مقدار موجود با ضریب اطمینان برای ایران در حدود ۰/۵ در نظر گرفته شده است. حجم کل با حجم تخمیر نهایی یکسان است. در قسمت کلاهدک هاضم، محفظه ذخیره گاز تعبیه خواهد شد و توصیه شده که شیب آن ۴۵ تا ۶۰ درجه باشد (Karimi & Mohammadi, 2015).

بعد از این که حجم قسمت ذخیره گاز نیز تعیین گردید، به تعیین ابعاد هاضم پرداخته می‌شود. برای تعیین ابعاد رآکتور، هاضم به صورت استوانه عمودی در نظر گرفته شد. در این هاضم‌ها نسبت قطر به ارتفاع از اهمیت خاصی برخوردار است. در محاسبات ابعاد رآکتور، از نسبت ارتفاع به قطر ۰/۵ تا ۳/۵ می‌توان استفاده نمود (Nijaguna, 2012, Polprasert & Koottatep, 2007). برای اطمینان از عدم نشستی، حجم تخمیر هاضم با آب پر شده و قسمت گازی در فشار یک بار تست گردید. فشارسنج در حین این عمل هیچ‌گونه نشستی از کلاهدک را نشان نداد. برای ارزیابی سامانه بی‌هوازی، کود گاوی از گاوداری در نزدیکی تبریز تهیه گردید. در مخزن اولیه سوبسترا با نسبت یک‌به‌یک با آب ترکیب و آماده گشته و سپس توسط پمپ به داخل مخزن پمپ گردید. با توجه به خطر انفجار گاز، از جمع‌آوری و فشرده‌سازی آن خودداری گردید. این گاز بعد از تولید، روزانه تخلیه می‌شد و فشار گاز همواره روی psi ۴ ثابت نگه‌داشته می‌شد. ارزیابی سامانه بر اساس مقدار خروجی گاز در فشار ۰/۱ اتمسفر با اندازه‌گیری درصد حجمی متان گاز تولیدی هاضم توسط بررسی کننده گاز شرکت گاز استان آذربایجان شرقی انجام گرفت. همچنین، نمودارهای تولید گاز و درصد حجمی متان برحسب زمان ماند توسط نرم‌افزار Excel رسم گردید.

بر اساس مطالعات در بررسی منابع، محققان به این نتیجه رسیده‌اند که در نسبت ترکیب یک‌به‌یک فضولات با آب بهترین شرایط برای هضم مهیا می‌گردد. در این تحقیق مقدار آب مورد نیاز برای هضم تر با نسبت یک‌به‌یک در نظر گرفته شد. با استفاده از معادلات (۱) تا (۵) حجم قسمت تخمیر تعیین گردید. حجم ناحیه بیوگاز، حجم قسمت لجن و ابعاد رآکتور نیز با استفاده از معادلات (۶) تا (۱۱) تعیین شد تا در نهایت حجم کل سامانه تعیین گردد. در این تحقیق سعی بر آن شد تا نمونه پایلوت رآکتور ساخته شود تا بتوان از آن برای شبیه‌سازی رآکتورهای صنعتی و بزرگ استفاده نمود.

سوبستراهای مورد استفاده در تولید بیوگاز اغلب اوقات حاوی موادی هستند که اکسیژن آب را حذف می‌کنند. تجهیزات، تانک‌ها و لوله‌کشی‌هایی که محتوی چنین سوبستراهایی هستند، باید قابلیت اطمینان بالایی داشته باشند و نشستی در آن‌ها وجود نداشته باشد. استحکام اجزا به خصوص اتصالات و شیرها باید به گونه‌ای باشد که به‌سادگی و با ضریب اطمینان بالا کنترل شوند. اسیدسولفوریک، آمونیاک و اسید نیتریک به‌ویژه در مخازن ذخیره بیوگاز، باعث ایجاد خوردگی می‌شود و در صورتی که pH کم باشد، سطوح مخازن که در تماس مایع هستند، در معرض نشستی قرار می‌گیرند. تمامی اجزا داخلی بیورآکتور تولید بیوگاز در معرض خوردگی قرار دارند. بیش‌تر تجهیزات واحدها، بیش‌تر اوقات در زیرزمین ساخته می‌شود بنابراین، مصالح کمی می‌تواند برای ساخت آن‌ها استفاده گردد. اجزای اصلی یک واحد هضم بی‌هوازی شامل تانک آماده‌سازی خوراک، رآکتور زیستی و مخزن ذخیره گاز است که بر اساس کاربرد و محتویات هر یک از آن‌ها باید جنس مناسب انتخاب گردد.

مرحله اول بعد از طراحی هاضم و محاسبه، انتخاب جنس بدنه است. با توجه به این که مخزن قابل حمل ساخته می‌شد، لذا نمی‌توان مخازن را از جنس بتن و آجر انتخاب کرد. در انتخاب جنس برای رآکتور بیوگاز، دو مورد باید در نظر گرفته می‌شد: (۱) مقدار اسیدی بودن سوبسترا و احتمال خوردگی، (۲) انتقال حرارت آن. در جنس انتخابی برای ساخت رآکتورها در حجم کم‌تر از ۱۰۰۰ لیتر معمولاً جنس‌های استیل و فایبرگلاس توصیه شده است (Karimi & Mohammadi, 2015).

در روابط، نیاز به تعیین نرخ بارگذاری وجود دارد. بر اساس مطالعات، نرخ بارگذاری بین ۱ تا ۴ کیلوگرم مواد جامد فرار به‌ازای حجم هاضم در روز است. همچنین به این نتیجه رسیده‌اند که بهترین نرخ بارگذاری ۲ کیلوگرم بر مترمکعب هاضم در روز است (Ferrer et al., 2009; Metcalf et al., 2003; Polprasert & Koottatep, 2007; Sharma & Pellizzi, 1991). با توجه به مطالعات انجام گرفته در این زمینه نرخ بارگذاری مناسب بین ۱/۵ تا ۲ کیلوگرم مواد جامد فرار به ازای مترمکعب هاضم است. در این تحقیق از نرخ بارگذاری ۲ کیلوگرم مواد جامد فرار به ازای یکمترمکعب هاضم در روز استفاده گردید (Babaei & Shayegan, 2011). در مورد زمان ماند به این نتیجه رسیدند که حدود یک‌سوم بیوگاز تولیدشده در ۱۰ روز اول و در ۵۰ روز بعدی حدود دوسوم بیوگاز از فضولات گاوی خارج می‌شود (Anonymous, 2014). در منابع زمان تولید بیوگاز بین ۶۰ تا ۹۰ روز بیان شده است که در این تحقیق به‌طور متوسط ۶۰ روز در نظر گرفته شد.

مقدار نرخ بارگذاری (Q) در معادله (۱) برابر ۰/۰۴۵۴ مترمکعب در روز است. با در نظر گرفتن نرخ بارگذاری ۲ کیلوگرم مواد جامد فرار به ازای هر مترمکعب هاضم و همچنین بر اساس نتایج آزمایشگاهی، جرم مخصوص برابر ۱۰۸۰ کیلوگرم به ازای هر مترمکعب و درصد مواد جامد و جامد فرار به ترتیب برابر ۹/۷۴ و ۸۲/۶ درصد است. حجم تخمیر مورد نیاز برابر ۱/۹۷۲ مترمکعب است که هزینه ساخت این حجم از استیل ۳۱۶ و ۳۰۴ به‌مراتب بالا است. برای کاهش هزینه بر اساس اندازه استیل موجود در بازار، حجم هاضم بهینه‌سازی گردید. اندازه استیل موجود در بازار برابر ۳×۲ مترمربع است. با در نظر گرفتن ۰/۵ مترمکعب گاز مصرفی در شرایط فشار ۰/۱ اتمسفر و یا ۰/۰۵ مترمکعب در شرایط STP مقدار فضولات مورد نیاز روزانه برابر ۰/۰۲۲۷ مترمکعب و حجم مورد نیاز برای تخمیر برابر ۰/۰۹۸۶ مترمکعب است. به این ترتیب حجم گاز مورد نیاز کاهش یافت تا با استفاده بهینه از ابعاد استیل، هاضم ساخته شود. در جدول ۲ مقدار Q و حجم تخمیر برای سایر مقادیر مصرف بیوگاز ارائه شده است. با توجه به جدول ۲، زمانی که نیاز به ۱۵۰ لیتر بیوگاز باشد، حجم مورد نیاز تخمیر برابر ۲۹۵ لیتر است. برای این حجم نیاز به یک مقدار لجن فعال‌سازی یا مخمر وجود دارد که ۱۰٪ حجم تخمیر در نظر گرفته شده است.

برای ارزیابی هاضم بی‌هوازی مقدار ۱۵۰ کیلوگرم از فضولات گاوی تازه با ۱۵۰ کیلوگرم آب مخلوط و بارگذاری انجام شد. مدت آزمون این مرحله ۴۲ روز بود و دمای کاری ۴۰ درجه سلسیوس است و همزنی هر ۶ ساعت به مدت ۵ دقیقه انجام می‌گرفت. سیستم شروع به کار کرده و هر روز دو بار با توجه به نرخ تولید و فشار (هر ۱۲ ساعت) تخلیه گاز انجام می‌گرفت. به‌صورت روزانه مقدار درصد متان توسط بررسی کننده گاز HS680 اندازه‌گیری می‌شد. با توجه به این‌که نمونه پایلوت در محیط آزمایشگاهی ساخته شد و مقرر گردید به‌عنوان یک سامانه آزمایشگاهی در آزمایشگاه بیوانرژی و بازیافت نصب گردد، بنابراین ضمن برآورد نمودن اهداف طرح پایلوت، امکان انجام آزمایشات شبیه‌سازی با آن نیز فراهم گردید.

در خروجی گاز برای اندازه‌گیری دقیق مقدار تولید و حذف تأثیرات فشار گاز بر روی اندازه‌گیری از رگلاتور گاز در خروجی هاضم استفاده شد. رگلاتور، فشار گاز را تنظیم و رطوبت آن را جذب می‌نمود. این دو عمل توسط یک دستگاه انجام می‌گرفت. این رگلاتور می‌تواند از صفر تا ۵ بار را کنترل و تا ۹ بار را تحمل نماید. مقدار گاز در فشار خروجی ۰/۲۵ psi اندازه‌گیری شد. یک کنترلر آزمایشگاهی مدل SPX ۱۹۹۴ کلاس A برای اندازه‌گیری مقدار بیوگاز خروجی استفاده شد. این کنترلر دارای دقت ۵ سی‌سی بود و می‌تواند تا فشار ۹ بار را تحمل نماید.

برای اندازه‌گیری فشار از دو فشارسنج استفاده گردید. یک فشارسنج عقربه‌ای با دقت ۲ psi و حداکثر فشار اندازه‌گیری ۳ بار و یک فشارسنج دیجیتالی برای کنترل فشار و ثبت داده‌ها.

## نتایج و بحث

### طراحی حجم و ابعاد هاضم

با استفاده از معادله (۳) و در نظر گرفتن ترکیب یک‌به‌یک آب، بهترین ترکیب سوبسترا برای تولید بیوگاز بود (Jalali et al., 2018). حجم مورد نیاز برای محفظه تخمیر برابر ۱/۷۹۲ مترمکعب برآورد شد. با توجه به این‌که ساخت این محفظه از استیل هزینه زیادی را می‌خواهد و همچنین در آزمایشگاه امکان جابه‌جایی نبود، لذا این مقدار برای اندازه آزمایشگاهی تغییر یافت تا هزینه ساخت کاهش یابد. این کم شدن حجم بر اساس یافته محققان روی نتایج آزمایش تأثیری نخواهد داشت.



با اضافه نمودن حجم مخمر مقدار حجم تخمیر برابر ۳۲۴/۵ لیتر می‌گردد. این مقدار حجم نیاز به ۳۰ لیتر مخمر، ۱۵۰ لیتر کود گاوی تازه و ۱۵۰ لیتر آب دارد تا در حالت محموله‌ای بیوگاز ۱۵۰ لیتر در روز تولید گردد.

جدول ۲- حجم مورد نیاز تخمیر (لیتر) بر اساس سوبسترای مورد نیاز

حجم گاز مورد نیاز روزانه جهت مصرف (لیتر)	مقدار سوبسترای مورد نیاز روزانه (Q) (لیتر)	حجم مورد نیاز تخمیر (لیتر)	حجم مورد نیاز تخمیر با ۱۰ درصد حجم مخمر (لیتر)
۱۰۰۰	۴۵/۴	۱۹۷۲	۲۱۶۹/۲
۵۰۰	۲۲/۷	۹۸۶	۱۰۸۴/۶
۲۵۰	۹/۱	۳۹۵	۴۳۴/۵
۱۵۰	۶/۸	۲۹۵	۳۲۴/۵
۱۰۰	۴/۵	۱۹۶	۲۱۵/۶

حدود ۱۳۵ سانتی‌متر است. جداره دوم آن، قسمت آب‌گرم‌کن نیز از جنس استیل ۳۰۴ است.

### نتایج حاصل از ارزیابی سامانه هضم بی‌هوازی

مشخصات سوبسترای استفاده شده عبارت است از: نسبت ترکیب با آب (یک به یک)، درصد مواد جامد (TS)، درصد رطوبت، درصد مواد جامد فرار (VS)، درصد خاکستر، COD و جرم مخصوص که به ترتیب برابر ۸/۳۲، ۹۱/۶۸، ۸۲/۹۴، ۱۷/۰۶، ۹/۸ و ۱۰۸۳ هستند. با توجه به آزمایشات، نسبت کربن به نیتروژن ۲۱:۱ ارزیابی گردید (جدول ۳).

مقدار pH ورودی برابر ۷/۳ بود. در این تحقیق مقدار تولید بیوگاز روزانه و درصد متان مورد ارزیابی قرار گرفت. مقدار بیوگاز تولیدشده بعد از ۴۸ ساعت و درصد متان بعد از ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شدند. بعد از بارگذاری، هاضم راه‌اندازی گردید. همزنی هر ۶ ساعت به مدت ۵ دقیقه با سرعت ۱۰۰ دور در دقیقه انجام می‌گرفت و دمای هاضم در ۴۰ درجه سلسیوس ثابت نگاه‌داشته شده بود (شکل ۵ و ۶). نتایج حاصل از درصد تولید متان در مدت ۴۰ روز در شکل ۶ نشان داده شده است. بیش‌ترین درصد تولید متان ۷۹ درصد بود. تست شعله در روز دهم انجام گرفت و بیوگاز تولیدی با ۶۳ درصد متان قابلیت اشتعال را داشت (شکل ۷) که با افزایش درصد متان، رنگ شعله به سمت آبی کم‌رنگ میل می‌کرد. با توجه به نمودار ابتدا افزایش در تولید متان وجود دارد. بعد از افزایش و رسیدن به نقطه اوج این مقدار تقریباً ثابت باقی می‌ماند. این داده‌ها در مدت ۴۰ روز توسط دستگاه بررسی کننده گاز HS680 با

مقدار حجم مورد نیاز گاز برای ذخیره‌سازی یک روزه در خود هاضم، برابر ۷۷ لیتر است. حجم نهایی هاضم برابر مجموع حجم ذخیره گاز و حجم تخمیر است که برابر است با ۴۰۱/۵ لیتر اما برای محاسبات ابعاد ۴۰۰ لیتر در نظر گرفته شد.

محققان به این نتیجه رسیده‌اند که بهترین نسبت ارتفاع به قطر برای هاضم برابر دو به یک است (Nijaguna, 2012). ابعاد رآکتور به دست آمد. بعد از محاسبه قطر رآکتور، ارتفاع قسمت حجم ذخیره گاز و ارتفاع قسمت لجن نیز محاسبه گردید. بنابراین با استفاده از معادله (۶)، قطر هاضم برابر خواهد بود با:

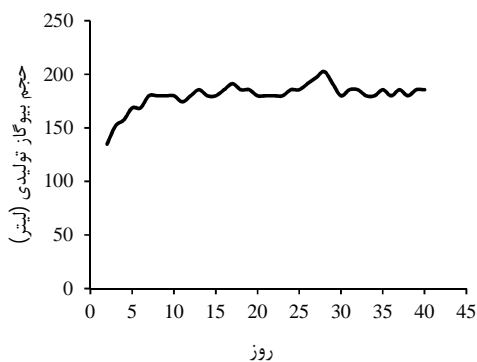
$$V_f = \frac{\pi D^2}{4} H = \frac{\pi D^2}{4} 2D = 0.324$$

از معادله بالا مقدار قطر محاسبه شده برابر ۰/۶ متر یا ۶۰ سانتی‌متر حاصل می‌شود. ارتفاع ناحیه تخمیر برابر ۱/۲ متر است. در بالای این حجم ناحیه گازی وجود دارد که بر اساس حجم ناحیه گازی محاسبه شده و قطر مخزن ارتفاع آن به دست آمد که برابر ۰/۲۷۲ متر شد. در نتیجه ارتفاع کل هاضم ۱۴۷/۲ سانتی‌متر است. درحالی‌که، بعد از ۱۰ سانتی‌متر از بالای حجم تخمیر با زاویه ۴۵ درجه شیب برای محفظه گاز در نظر گرفته شد. حجم محفظه گاز به‌صورت مخروط ناقص ساخته شد تا در کلاهک مکانی برای قرارگیری موتور همزن و آب‌بندی همزن وجود داشته باشد. بعد از طراحی ابعاد و انتخاب جنس، نقشه‌های اولیه استخراج شده مورد بررسی قرار گرفتند. بدنه اصلی هاضم ساخته شده، از جنس استیل ۳۱۶ است. این مخزن حالت استوانه‌ای داشته و قطر داخلی آن ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن در



شکل ۷- تست شعله با بهره‌گیری از یک وسیله گاز سوز متعارف در پخت‌وپز

میزان تولید روزانه بیوگاز در شکل ۸ نشان داده شده است. میزان تولید به طور متوسط ۱۸۰ لیتر در روز است. کل بیوگاز تولیدشده در این دوره برابر ۷۰۶۰ لیتر است. مقدار تولید روزانه بیوگاز در فشار ۰/۱ اتمسفر توسط کنتور گاز اندازه‌گیری شده است.



شکل ۸- حجم بیوگاز تولیدی در روز

### نتیجه‌گیری

با استفاده از معادلات مرتبط بین حجم هاضم و مقدار تولید بیوگاز و با انتخاب سوبسترای که کمترین میزان تولید بیوگاز را به‌ازای حجم دارد، اقدام به طراحی واحد گردید. مقدار حجم مورد نیاز گاز محاسبه شده برای ذخیره‌سازی یک روزه در خود هاضم، برابر ۷۷ لیتر است. حجم نهایی هاضم برابر مجموع حجم ذخیره گاز و حجم تخمیر و برابر با ۴۰۰ لیتر محاسبه گردید. سامانه آزمایشگاهی خودکار تولید بیوگاز در حجم ۳۳۰ لیتر در مقیاس پایلوت بر اساس طراحی استاندارد و مهندسی شده ساخته و ارزیابی شد. در این تحقیق تولید بیوگاز در ارزیابی برابر ۷۰۶۰ لیتر و حداکثر مقدار متان و بیوگاز تولیدی ۷۹ درصد و ۲۰۵ لیتر در روز بود. در روز ۱۰ و بعد از افزایش متان به بالای ۵۰٪ تست شعله انجام گرفته و رنگ شعله با افزایش درصد

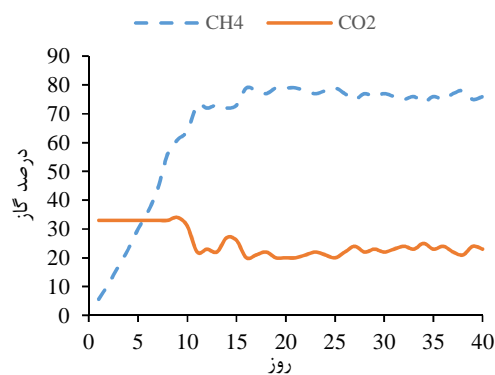
دقت یک درصد برای متان و کربن دی‌اکسید و محدوده اندازه‌گیری ۰ تا ۱۰۰ برای متان و ۰ تا ۳۳ درصد برای کربن دی‌اکسید در هر روز ثبت شده است (شکل ۶).



شکل ۴- محفظه تخمیر هاضم



شکل ۵- سامانه رآکتور هاضم بی‌هوازی آماده کار



شکل ۶- درصد متان تولید در ۴۰ روز

- Ghaemi, F., & Sadeghi, H. (2014). *Biogas technology in Iran*. Noor Alam Publications, Tehran. (In Persian).
- David, H. (2010). *The Complete Biogas Handbook*. Alternative House Information.
- Jalali, A., Abdi, R., Abdollahpour, Sh., & Ranjbar, F. (2018). *Design, construction, evaluation and simulation of anaerobic digestion to produce biogas production*. Ph.D thesis. Biosystem Engineering departement. University of Tabriz. Tabriz, Iran. (In Persian)
- Karami, K., & Mohammad Sadeghi, S. (2015). *Principles and technology of biogas production*. Isfahan University of Technology. Press, Isfahan. (In Persian)
- Leckie, J., Masters, G., Whitehouse, H., & Young, L. (1981). *More Other Homes and Garbage: Designs for Self-Sufficient Living*, Complete Revised, Expanded, and Updated.. Sierra Club, San Francisco, CA.
- Lissens, G., Vandevivere, P., De Baere, L., Biey, E. M., & Verstraete, W. (2001). Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion. *Water Science and technology*, 44(8): 91-102.
- Luning, L., Van Zundert, E. H. M., & Brinkmann, A. J. F. (2003). Comparison of dry and wet digestion for solid waste. *Water science and technology*, 48(4): 15-20.
- Metcalfe, L., Eddy, H. P., & Tchobanoglous, G. (2003). *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse* (Vol. 4). New York: McGraw-Hill.
- Mousavi Gheidari, R., & Gholami, Z. (2014). *Basics design of biogas production units*. Iranian Students Booking Agency. Zanjan, (In Persian).
- Nijaguna, B. T. (2012). *Biogas technology. Chapter 2, Design selection construction*, New Delhi: New Age International Pvt Limited.
- Polprasert, C. (2007). *Organic waste recycling: technology and management*. IWA publishing.
- Qi B., Aldrich C., Lorenzen L., & Wolfaardt G. 2005. Acidogenic fermentation of lignocellulosic substrate with activated sludge. *Chem Eng Commun*, 192: 1221-1242.
- Rasapur, M., Ajabshirchi, Y., Adl, M., Abdi, R., & Gharibi, A. (2016). *Evaluation of the effects of pre-treatment with ultrasonic waves on biogas production efficiency of food waste in anaerobic digestion of the predominant hybrid flow under moderate solids conditions*. PhD
- متان از بی‌رنگ به آبی کم‌رنگ تمایل پیدا می‌کرد. بعد از مدت ۱۷ روز روند تولید متان ثابت بود.

## منابع

- Abbaspourfard, M., H., Ebrahimi Nik, M. A., & Khojastehpour, M. (2011). *Bioenergy Option for cleaner environment*. Ferdowsi University of Mashhad Press, Mashhad. (In Persian)
- Anonymous (2014). *Design of biogas Plant, Biogas Training Center (BRC)*. Chengdu, Sichuan, China.
- Rohlich, G. A., & Walbot, V. (1977). *Methane generation from human, animal, and agricultural wastes-Report of an Ad Hoc Panel (on Methane Generation) of the Advisory Committee on Technology Innovation*, Board on Science and Technology for International Development, Commission on International Relations, NRC
- Babae, A., & Shayegan, J. (2011). Effect of organic loading rates (OLR) on production of methane from anaerobic digestion of vegetables waste. *In World Renewable Energy Congress-Sweden*; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden, 57: 411-417.
- Bolzonella, D., Pavan, P., Mace, S., & Cecchi, F. (2006). Dry anaerobic digestion of differently sorted organic municipal solid waste: a full-scale experience. *Water Science and Technology*, 53(8): 23-32.
- Bruni, E., Jensen, A. P., & Angelidaki, I. (2010). Comparative study of mechanical, hydrothermal, chemical and enzymatic treatments of digested biofibers to improve biogas production. *Bioresource technology*, 101(22): 8713-8717.
- Brunn, L., Dornack, C., & Bilitewski, B. (2009). Application of laboratory scale experiments to industrial scale in case of anaerobic waste treatment. *Fresenius Environmental Bulletin*, 18(2): 196-203.
- Drapcho, C. M., Nghim, N. P., & Walker, T. (2008). *Biofuels engineering process technology*. McGraw-Hill Education.
- Ferrer, I., Gamiz, M., Almeida, M., & Ruiz, A. (2009). Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru). *Waste Management*, 29(1): 168-173.
- Gallert, C., Henning, A., & Winter, J. (2003). Scale-up of anaerobic digestion of the biowaste fraction from domestic wastes. *Water research*, 37(6): 1433-1441.

- Thesis, Biosystem Engineering departement. University of Tabriz. Tabriz. (In Persian)
- Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2012). *Environmental biotechnology: principles and applications*. McGraw-Hill Education.
- Rowse, L. E. (2011). *Design of small scale anaerobic digesters for application in rural developing countries*. Ms Thesis. Civil and Environmental Engineering, University of South Florida.
- Schnurer, A., & Jarvis, A. (2010). *Microbiological handbook for biogas plants*. Swedish Waste Management U, 2009.
- Sharifi, M., & Khadem, A. ۱. (2012). *Ruminants and ruminal dynamics - biogas production*. Danesh Negar Publishing, Tehran, Tehran. (In Persian)
- Sharma, N., & Pellizzi, G. (1991). Anaerobic biotechnology and developing countries—I. *Technical status*. *Energy conversion and management*, 32(5): 447-469.
- Standard ASAE D384.2. (2005). *Manure production and characteristics*.
- Vandevivere, P., De Baere, L., & Verstraete, W. 2003. *Types of anaerobic digester for solid wastes*. Vol. 1, first ed., Iowa Publisher, Barcelona, 111-140.
- Ward A. J., Hobbs P. J, Holliman P. J., & Jones D. L. 2008. Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99: 7928-7940.
- Weiland, P. (2010). Biogas production: current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology*, 85(4): 849-860.